

SIMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE BÚSQUEDA EN ANIMALES CON POSIBLES APLICACIONES EN COMPUTACIÓN Y ROBÓTICA

Joel Ricardo Jiménez Cruz

Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

jcjr@xanum.uam.mx

Resumen

En este trabajo se describen y se simulan por medio del lenguaje de programación Netlogo, estrategias de búsqueda que emplean los animales para el forrajeo (recolección de recursos) en su hábitat natural. Se realizaron dos simulaciones, en la primera se simulan las estrategias de movimiento kinésicas (ortokinesis, klinokinesis y klinokinesis adaptativa) y en la segunda, las estrategias Wiggle y Saltatory. El movimiento de los organismos puede determinar una cierta distribución espacial y temporal de las poblaciones en función de la adaptación a su medio ambiente. Estas estrategias de navegación y búsqueda pueden servir de inspiración para implementar algoritmos de forrajeo en agentes computacionales y robots. Por ejemplo, unos nanorobots podrían reparar y mejorar algunas partes del cuerpo humano. Aunque la aplicación para cada una de las estrategias depende del contexto, se observó en los experimentos realizados que klinokinesis adaptativa y Saltatory son estrategias de búsqueda óptimas.

Palabras Claves: Búsqueda, forrajeo, kinesis, navegación, Netlogo.

Abstract

In this work, the search strategies used by animals in foraging (resource collection) in their natural habitat are described and simulated using the Netlogo programming language. Two simulations were performed, in the first one, the kinetic movement strategies (orthokinesis, klinokinesis and adaptive klinokinesis) were simulated and in the second, the Wiggle and Saltatory strategies. The movement of organisms can determine a certain spatial and temporal distribution

of populations depending on the adaptation to their environment. These navigation and search strategies can be used as an inspiration to implement foraging algorithms in computational agents and robots. For example, nanorobots could repair and improve some parts of the human body. Although the application for each of the strategies depends on the context, it was observed in the experiments carried out that adaptive klinokinesis and Saltatory are optimal search strategies.

Keywords: Foraging, kinesis, navigation, netlogo, search.

1. Introducción

El movimiento es un proceso biológico importante, presente en todos los organismos y con consecuencias para los individuos, las poblaciones, las especies y las comunidades biológicas. A través del movimiento, los organismos pueden localizar alimento, compañeros, refugio, un lugar donde vivir, etc., o pueden evitar depredadores o condiciones peligrosas. Tales factores afectan la vida de todo tipo de organismos que van desde bacterias, virus y otros organismos "simples" a organismos multicelulares más complejos y a una amplia variedad de grupos de animales [Pyke, 2015].

Generalmente los nutrientes se encuentran esparcidos temporal y espacialmente en el medio ambiente y los organismos deben implementar estrategias de búsqueda que les permitan obtener, por ejemplo, los recursos alimenticios en forma eficiente. A su vez, el movimiento de los organismos determinar la distribución espacio-temporal las poblaciones y especies, y por lo tanto, en última instancia, los patrones espaciales exhibidos por las comunidades biológicas.

El estudio y simulación de las bioestrategias de navegación y búsqueda son útiles para conocer y entender el comportamiento de los animales y con la posibilidad de aplicarlas en el desarrollo de algoritmos inteligentes en artefactos computacionales o robóticos.

Para la navegación y búsqueda de agentes o robots hay algoritmos clásicos de la Inteligencia Artificial como el algoritmo A* [Fernández, 2005] y otros basados en la Cibernética que están inspirados en la biología. En este trabajo se reportan bioestrategias de navegación y búsqueda simples basadas en la kinesis. En

particular se describen y simulan las estrategias de orthokinesis (orientación basada en la velocidad), klinokinesis (orientación basada en el ángulo de giro) y klinokinesis adaptativa (giro en función de la concentración), Saltatory (movimiento intermitente) y Wiggle (movimiento oscilatorio). La simulación de estos mecanismos se lleva a cabo en Netlogo. Netlogo es un lenguaje de programación multiagente que permite la exploración de fenómenos emergentes de una gran variedad de campos del conocimiento [Poza, 2009].

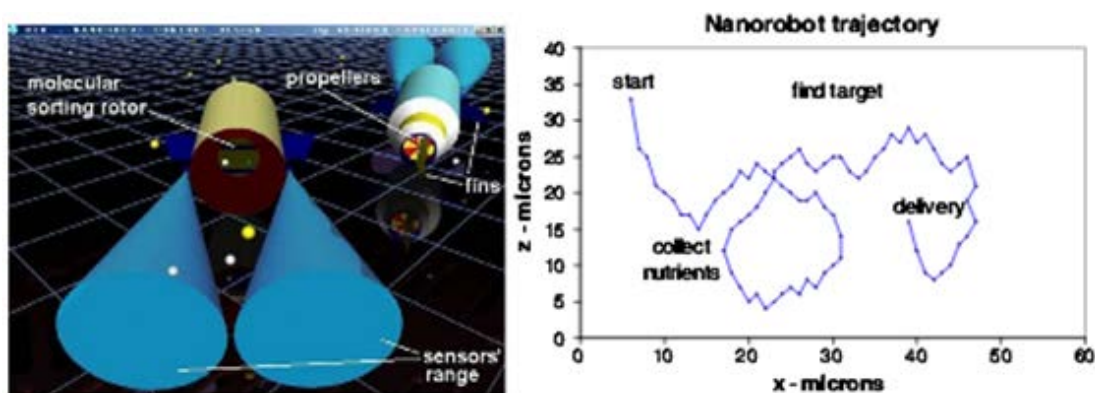
Uno de los problemas fundamentales de supervivencia de los organismos es el hallazgo, captura, consumo y utilización de fuentes de energía. Estas fuentes tienen un determinado valor nutritivo y se distribuyen en forma espacial y temporal y son limitadas en cantidad, representando un costo energético. Debido a que un posible consumidor tiene un tiempo y energía limitados, éste tiene que tomar decisiones de diversos tipos que pueden afectar su supervivencia. Existen algunas estrategias generales que han sido adoptadas por diversas especies, que permiten resolver eficientemente los problemas de forrajeo, siempre y cuando exista un balance entre el gasto de energía y la ganancia de ella [Gutiérrez, 1998]. La comprensión de estas estrategias movimiento, búsqueda y desplazamiento que siguen los animales en su hábitat natural nos pueden permitir diseñar aplicaciones artificiales como en el movimiento y la búsqueda inteligente en agentes y robots.

Sus aplicaciones en agentes pueden encontrarse en la búsqueda de artefactos en Internet y en robótica pueden utilizarse para encontrar y recolectar objetos, por ejemplo, los nanorobots podrían reparar y mejorar el cuerpo humano [Jones, 2008]. En la figura 1 se muestran nanorobots virtuales equipados con rotores moleculares, aletas, propelas y sensores que siguen una trayectoria para la búsqueda de un objetivo [Calvalcanti et al, 2008].

En la figura 2 se muestra la imagen de un nanorobot futurista, diseñado por [Svidinenko 2015], el cual realiza el monitoreo, localización y posible cirugía celular en el interior de una arteria con flujo sanguíneo.

En la siguiente sección se describen las características de la navegación y estrategias kinésicas, Saltatory y Wiggle que realizan los animales en ambientes dinámicos.

En la tercera sección se estudia una simulación de estas estrategias. En las últimas secciones se realizan la discusión y las conclusiones del trabajo.



[Tomada de Calvacanti et al, 2008]

Figura 1 Nanorobots virtuales y trayectoria de un nanorobot que busca un objetivo.



Figura 2 Nanorobots en el flujo sanguíneo para cirugía celular [Svidinenko, 2015].

2. Métodos

En esta sección se explica lo que se programó y simuló en Netlogo, basándose en los fundamentos de la navegación y búsqueda de los animales en medios ambientes dinámicos.

La navegación de los animales en entornos dinámicos tiene varios propósitos, entre ellos el de forrajeo (recolección de recursos) y la búsqueda de su nido, de una pareja o de un sitio específico. Se han identificado 3 estrategias o mecanismos de búsqueda individual y 3 patrones poblacionales generados por la distribución de la comida [Mueller, 2008].

Las estrategias individuales de movimiento se pueden clasificar en:

- Mecanismos sin orientación.

- Mecanismos con orientación.
- Mecanismos de memoria.

Los mecanismos sin orientación implican movimientos como la difusión y la kinesis que parecen movimientos aleatorios. Con estos mecanismos, los estímulos externos provocan una alteración en el ángulo de giro, la velocidad o la frecuencia del movimiento. Matemáticamente se pueden representar como paseos aleatorios correlacionados.

Los mecanismos con orientación se basan en la percepción de señales alejadas de la posición del animal y provocan un movimiento predecible que les permite a los animales acercarse a los recursos o a la ubicación de su destino. No se conocen bien los rangos de percepción y si estos operan a escalas temporales o espaciales en función de los cambios de disponibilidad de los recursos.

En los mecanismos basados en una memoria existe información acerca de la ubicación del objetivo. Esta información proviene de la experiencia, comunicación con sus congéneres o la genética. Estos mecanismos se basan en la integración de una ruta por medio de una brújula o por medio de mapas cognitivos que se obtienen a base de puntos de referencia conocidos. Las aves utilizan señales celestes, olfativas, coordenadas geomagnéticas y lugares de referencia que facilitan su navegación y regreso a su nido. Para los herbívoros, la investigación se ha centrado en el aprendizaje espacial de la localización de los recursos.

Para entender cómo se mueven los organismos, se requiere de un enfoque que compare estos tres mecanismos. Algunos modelos combinan la memoria con la información espacial y social y la evasión de depredadores.

La distribución dinámica de los recursos provoca que las estrategias de movimiento inmersas en la navegación individual de un grupo de individuos generen 3 distribuciones o patrones poblacionales:

- Sedentarismo. Se da con recursos que tienen poca variabilidad. El sedentarismo comprende estrategias en que los residentes se encuentran en un territorio establecido y cuando los recursos se encuentran disponibles durante mucho tiempo.

- Migraciones. Se produce con recursos de variabilidad estacional. La migración se define como un patrón de movimiento de distancias grandes y se observa en variaciones estacionales regulares. Son de naturaleza periódica y temporal dependiendo de su época de reproducción.
- Patrones nómadas. Los recursos aparecen con una distribución impredecible. El nomadismo se presenta como un patrón de movimiento que no se repite durante un periodo largo. Se produce cuando los recursos fluctúan de manera irregular o impredecible en grandes áreas geográficas.

La estructura del territorio es un factor importante para determinar la eficiencia de los mecanismos de movimiento y los patrones de distribución de la población. La disponibilidad de recursos puede deberse a su configuración espacial, variabilidad temporal y previsibilidad.

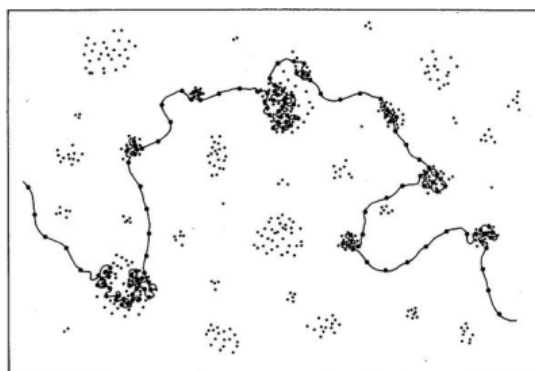
La distribución de los recursos afecta la eficacia de los mecanismos de movimiento y búsqueda. En los territorios con poca variabilidad, la memoria es importante. Una experiencia previa es una fuente importante de información para movimientos futuros.

De estos mecanismos de navegación y búsqueda, en este trabajo, nos enfocamos en simular inicialmente los mecanismos sin orientación que involucran movimientos simples como la difusión (concentración) y la kinesis (gradientes) y que dan como resultado una decisión de movimiento. En particular estudiamos y simulamos las siguientes estrategias simples de movimiento: orthokinesis, klinokinesis y klinokinesis adaptativa. También se simularon las estrategias saltatory (intermitente) y Wiggle (oscilatoria).

La ortokinesis, klinokinesis y klinokinesis adaptativa son modelos probabilísticos que corresponden a reacciones motoras elementales respecto a la posición de los estímulos y que regulan el cambio de movimiento del animal en base de su velocidad en el caso de la ortokinesis y de la dirección en el caso de la klinokinesis. Si no existe una adaptación (mecanismo absoluto) la regulación es una función del valor real de la intensidad del estímulo y cuando el animal se adapta (mecanismo diferencial), la regulación es una función de las variaciones en

la intensidad del estímulo que son percibidas durante el movimiento, como en el caso de la klinokinesis adaptativa [Benhamou, 1989].

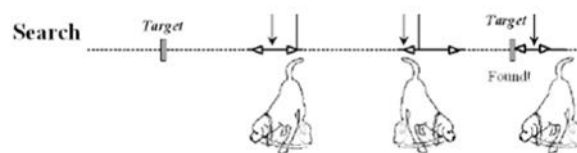
En la figura 3 se muestran los movimientos de forrajeo de un animal en un entorno de parcelas. Los puntos pequeños representan la posición de las presas y los puntos más grandes la posición del animal. Se observa que los mecanismos ortokinésicos y klinokinésicos producen una conducta de búsqueda en un área determinada que les permite a los animales permanecer por más tiempo en las regiones de un alto contenido de presas. Entre las simulaciones que se muestran en la sección de resultados, se reproducen los mecanismos que se observan en esta figura.



[Tomada de Benhamou, 1989]

Figura 3 Movimientos de forrajeo ortokinésicos y klinokinésicos de un animal en un entorno de parcelas.

Por otro lado, en este trabajo también se programaron en Netlogo las estrategias de búsqueda Saltatory y Wiggle que son mecanismos de movimiento que han sido observados en diferentes organismos para encontrar recursos. En la estrategia de movimiento Wiggle, el animal realiza rutinas de giros oscilatorios y redundantes sobre pequeñas áreas de búsqueda y durante un periodo suficiente de tiempo que le permite escanear el medio de manera sensitiva. En la estrategia de movimiento Saltatory se extiende el movimiento Wiggle integrando un movimiento de desplazamiento después de una rutina de oscilación (Wiggle) y repitiendo la serie, figura 4. En la estrategia Saltatory, los animales buscan de una manera intermitente: avanzan, hacen una breve pausa y avanzan otra vez [Anderson et al, 1997].



[Tomada de Anderson et al, 1997]

Figura 4 Movimiento Saltatory.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de las dos simulaciones que se realizaron. Por una parte se simularon las estrategias de movimiento kinésicas y por otro, las estrategias Wiggle y Saltatory. En ambas se pretende encontrar cuál es la mejor estrategia de movimiento de acuerdo a la distribución de los recursos en el medio ambiente.

Simulaciones de las Estrategias Kinésicas

Se realizaron 4 simulaciones que comparan las estrategias de deambular azarosamente (wander), klinokinesis, ortokinesis y klinokinesis adaptativa [Nelson, 2017]. En el programa implementado en Netlogo se van escogiendo 4 escenarios de distribución de recursos: aleatorio (random), en un agrupamiento (cluster), en franja como en un fluido (stream) o en varios agrupamientos (clusters). Este último nos permitirá simular la figura 3 del artículo de Benhamou y Bovet [1989].

En cada una de las simulaciones el programa se corre 5 veces con un tiempo de 5000 ticks para cada uno de los escenarios (aleatorio, cluster, fluido y clusters) y se anota en cada uno de ellos el número de porciones de comidas (pellets) que el agente consumió.

Simulación 1. El agente Deambula (wander) en Diferentes Escenarios

En la figura 5 se muestra la corrida en los 4 escenarios cuando el agente deambula en su medio ambiente. En el escenario aleatorio (random) los recursos se distribuyen en forma estocástica mientras que en el agrupado se da una concentración aleatoria circular en la parte central del territorio. En el escenario como una franja los recursos están esparcidos en forma de un río. Cuando hay

varias conglomeraciones o parcelas de recursos, los agentes ajustan sus estrategias de búsqueda.

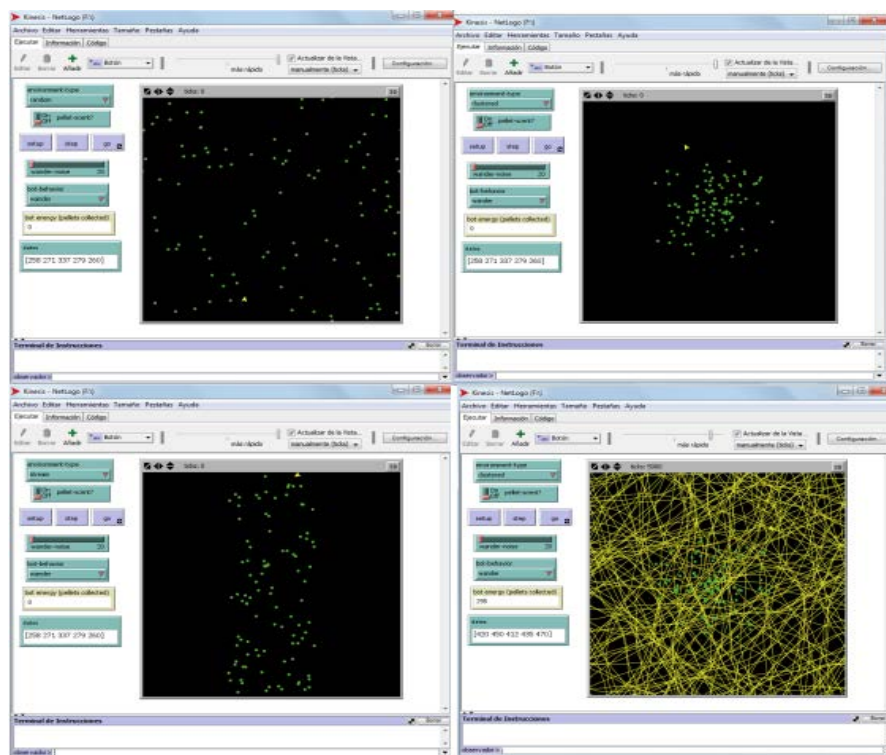


Figura 5 Comportamiento del agente que deambula en los cuatro escenarios.

En la tabla 1 se muestran cantidades de pellets consumidos utilizando la estrategia de movimiento azaroso en cada uno de los escenarios y su promedio y desviación estándar.

Tabla 1 Pellets consumidos en cada uno de los medios ambientes, cuando el agente utiliza el movimiento de deambular.

Escenario	Número de pellets	Promedio, \pm des.est
Aleatorio (random)	[356 348 320 326 356]	341 \pm 8
Agrupado (cluster)	[296 291 223 276 307]	279 \pm 15
Fluido (stream)	[258 271 337 279 260]	281 \pm 15
Varios grupos (clusters)	[111 104 84 109 113]	104 \pm 5

Utilizando un movimiento errático, se puede observar que en el escenario aleatorio (random) se obtiene una mayor recolección de alimento. Es decir, en un ambiente

donde los recursos se hayan distribuidos aleatoriamente, la mejor estrategia a utilizar es el vagar o deambular por el ambiente.

Simulación 2. Klinokinesis

En la figura 6 se muestra la corrida en los 4 escenarios cuando el agente utiliza la estrategia de klinokinesis en su medio ambiente.

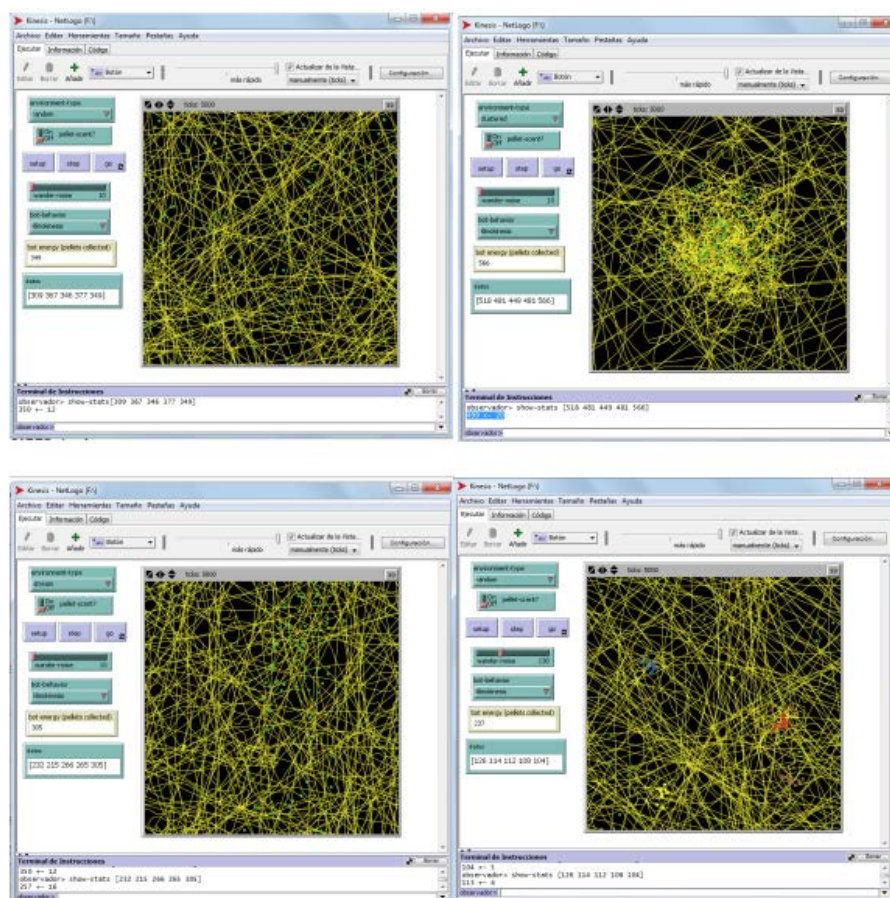


Figura 6 Aplicación de la estrategia de klinokinesis en cuatro diferentes ambientes.

En la tabla 2 se muestran cantidades de pellets consumidos utilizando la estrategia de movimiento de klinokinesis en cada uno de los escenarios y su promedio y desviación estándar. En esta simulación se observa que la estrategia de klinokinesis es útil cuando los recursos se encuentran distribuidos en una parcela o en varias de ellas.

Tabla 2 Pellets consumidos por el animal utilizando la estrategia de klinokinesis

Escenario	Número de pellets	promedio, \pm
Aleatorio (random)	[309 367 346 377 349]	350 \pm 12
Agrupado (cluster)	[126 114 112 108 104]	113 \pm 4
Fluido (stream)	[232 215 266 265 305]	257 \pm 16
arios grupos (clusters)	[518 481 449 481 566]	499 \pm 20

Simulación 3. Ortokinesis

En la figura 7 se muestra la corrida en los 4 escenarios cuando el agente emplea el mecanismo de ortokinesis en su medio ambiente.

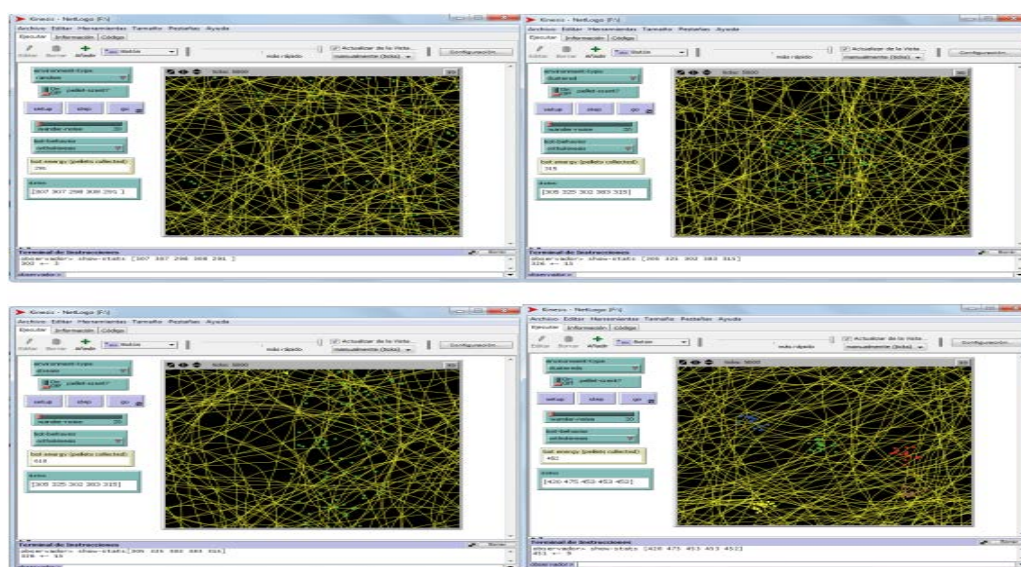


Figura 7 Aplicación de la estrategia de ortokinesis en 4 medios ambientes.

En la tabla 3 se muestran cantidades de pellets consumidos utilizando la estrategia de movimiento de ortokinesis en cada uno de los escenarios y su promedio y desviación estándar.

Tabla 3 Cantidad de recursos obtenidos en los 4 escenarios utilizando ortokinesis.

Escenario	Número de pellets	promedio, \pm des.est
Aleatorio (random)	[307 307 298 308 291]	302 \pm 3
Agrupado (cluster)	[420 475 453 453 452]	451 \pm 9
Fluido (stream)	[305 325 302 383 315]	326 \pm 15
Varios grupos (clusters)	[305 325 302 383 315]	326 \pm 15

Con los valores obtenidos en la tabla 3 se observa que con la estrategia de ortokinesis los agentes obtienen una mayor recolección recursos en un ambiente agrupado.

Simulación 4. klinokinesis Adaptativa ('run-tumble': voltereta)

En la figura 8 se muestra la corrida en los 4 escenarios cuando el agente realiza la estrategia de klinokinesis adaptativa en su medio ambiente. Esta estrategia se puede observar en las bacterias.

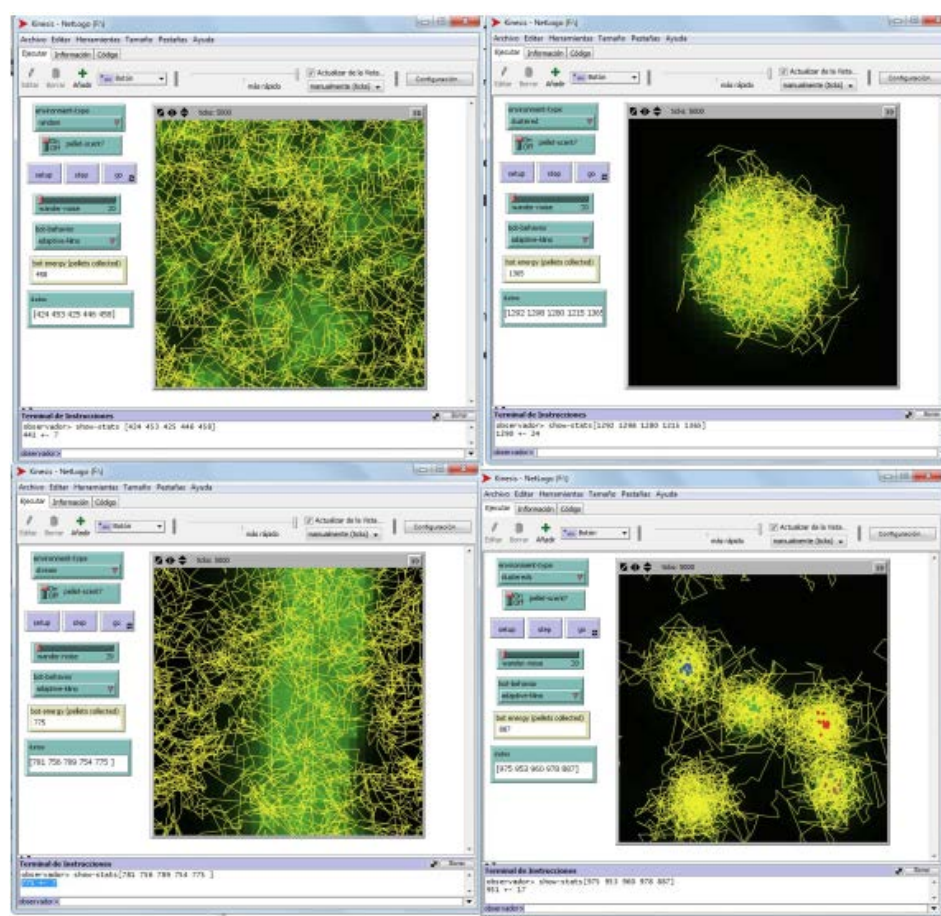


Figura 8 Aplicación del mecanismo de Klinokinesis adaptativa en 4 diferentes entornos.

En la tabla 4 se muestran cantidades de pellets consumidos utilizando la estrategia de movimiento de klinokinesis adaptativa en cada uno de los escenarios y su promedio y desviación estándar.

Tabla 4 Cantidad de pellets recogidos utilizando la estrategia de klinokinesis adaptativa.

Escenario	Número de pellets	promedio, \pm des. est
Aleatorio (random)	[424 453 425 446 458]	441 \pm 7
Agrupado (cluster)	[975 953 960 978 887]	951 \pm 17
Fluido (stream)	[781 756 789 754 775]	771 \pm 7
Varios grupos (clusters)	[1292 1298 1280 1215 1365]	1290 \pm 24

En la tabla 4 se puede determinar que la estrategia de klinokinesis adaptativa es particularmente útil cuando los recursos se encuentran en uno o varios amontonamientos. También se puede apreciar que esta estrategia es útil cuando los recursos se hayan esparcidos en una franja o fluido.

En la tabla 5 se muestra un resumen de la cantidad de pellets recogidos en las simulaciones realizadas de acuerdo a las estrategias y a los escenarios utilizados. Se observa que en todos los escenarios, la mejor estrategia sería la klinokinesis adaptativa.

Tabla 5 Pellets recogidos utilizando los diversos escenarios y técnicas de recolección.

entorno	aleatorio	flujo	cluster	clusters
vagar	341 \pm 8	281 \pm 15	104 \pm 5	279 \pm 15
klinokinesis	350 \pm 12	257 \pm 16	113 \pm 4	499 \pm 20
orthokinesis	302 \pm 3	326 \pm 15	451 \pm 9	326 \pm 15
klino adaptiva	441 \pm 7	771 \pm 7	951 \pm 17	1290 \pm 24

Simulaciones de las Estrategias Wiggle y Saltatory

En esta sección se presentan las simulaciones que comparan las estrategias Wiggle y Saltatory en una situación médica donde un grupo de nanorobots tratan de encontrar productores cancerígenos dentro de los vasos sanguíneos. Se simula en el medio ambiente del vaso sanguíneo los glóbulos rojos, los nanorobots y elementos productores de una sustancia química (e-cadherin) asociada con la producción de cáncer. La función de los nanorobots es encontrar a estos productores con el fin de eliminarlos [Cuevas, 2008].

En la simulación intervienen los siguientes elementos:

- Ambiente: Simulación del torrente sanguíneo en el cual interactúan los productores, glóbulos y buscadores.

- Productores: Representan al productor de e-cadherin que se encuentra en el vaso.
- Glóbulos: Glóbulos rojos que forman parte del torrente del vaso sanguíneo.
- Buscadores: Nanorobots de búsqueda que son insertados dentro del vaso sanguíneo.
- Spinners: Reloj que lleva un control del tiempo (en tick's) que transcurrirá durante las diferentes pruebas, en las cuales los buscadores localizan al productos.

En Netlogo estos elementos quedan representados de la siguiente manera:

- breed [productores productor]
- breed [globulos globulo]
- breed [buscadores buscador]
- breed [spinners spinner]

El movimiento de la estrategia wiggle en Netlogo quedó definido con el procedimiento: Wiggle {right random 15 forward .0005 left random 15 forward .0005}. En la figura 9 se muestra una corrida de la simulación con el movimiento Wiggle.

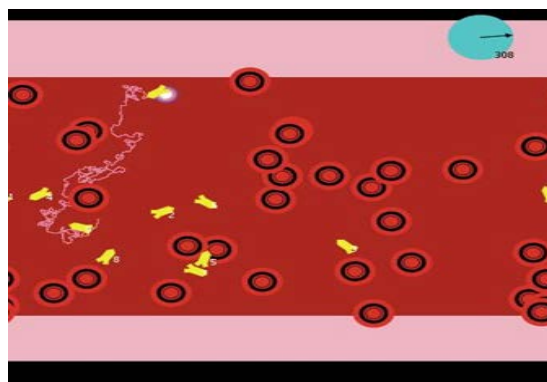


Figura 9 Simulación de la estrategia de movimiento Wiggle implementada en nanorobots dentro de un vaso sanguíneo.

Para implementar el movimiento Saltatory se modifica ligeramente el comportamiento oscilatorio (Wiggle), agregando un pequeño desplazamiento

considerando que los sensores del nanorobot solo perciben el área o patch en la que se encuentran.

La simulación del movimiento de la estrategia Saltatory quedó definida con el procedimiento: Saltatory { forward .05 Wiggle}. En la figura 10 se muestra una corrida de su simulación.

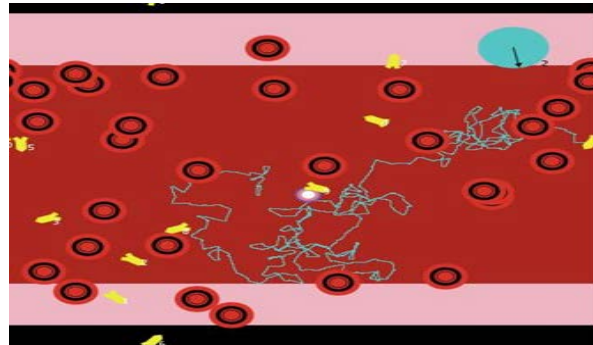


Figura 10 Simulación de nanorobots dentro de un vaso sanguíneo, estrategia de movimiento Saltatory.

En Piña, Rechy y García [2008] se presenta un refinamiento de esta simulación agregando parámetros para la densidad y viscosidad del fluido, comparando las estrategias Wiggle, Saltatory y deambular.

4. Discusión

La detección de recursos distribuidos aleatoriamente en el espacio es una tarea común tanto en agentes y robots como en sistemas biológicos.

Si bien los algoritmos que se han presentado muestran un grado adecuado de resolución de problemas, se puede discutir que existen otros algoritmos sin inspiración biológica que dan iguales o mejores resultados. Lo que sucede es que los algoritmos biológicos buscan y tienen generalmente un mayor grado de adaptabilidad cuando suceden cambios inesperados.

En las corridas que se hicieron de las simulaciones se observó que los mecanismos aleatorios realizan bien su trabajo y son relativamente más simples de implementar y menos costosos computacionalmente hablando. Es por ello que se pregunta uno si vale la pena indagar y construir otros algoritmos más

sofisticados. Los mecanismos aleatorios les han servido a los animales para sobrevivir en diferentes entornos y bajo muy diversas circunstancias. Aun así, han especializado sus mecanismos y estrategias cuando se requiere más rapidez y eficacia en la búsqueda.

Uno de los problemas principales en la implementación de algoritmos de búsqueda con inspiración biológica es la construcción de sensores que imiten a lo biológico. Entre mayor sea la inteligencia que se quiera implementar en un artefacto artificial, mayor debe ser la similitud biológica de los sensores.

5. Conclusiones

En este trabajo se han mostrado las simulaciones en Netlogo de las bioestrategias de movimiento y búsqueda que utilizan los organismos y que se podrían implementar en el caso de agentes computacionales o robots.

Se pudo comprobar que en un ambiente donde los recursos se hayan distribuidos aleatoriamente, la mejor estrategia a utilizar es el vagar o deambular por el ambiente. Se observó que los mecanismos ortokinésicos y klinokinésicos permiten a los animales permanecer por más tiempo en las regiones de un alto contenido de recursos. Klinokinesis es útil cuando los recursos se encuentran distribuidos en una parcela o en varias de ellas, mientras que con ortokinesis se obtiene una mayor recolección recursos en un ambiente agrupado. La estrategia Wiggle permite obtener una mejor percepción local mientras que Saltatory es más rápida y permiten ir recorriendo y abarcando una mayor área de búsqueda.

Aunque la aplicación para cada una de las estrategias depende del contexto, se observó en términos generales en los experimentos realizados que klinokinesis adaptativa y Saltatory son estrategias de búsqueda óptimas.

Hay una serie de algoritmos en los que se puede continuar esta investigación y que consisten en utilizar estrategias intermitentes de búsqueda como Saltatory que combinan fases de movimiento lento, con fases de movimiento rápido, minimizando el tiempo de búsqueda [Bénichou, 2011].

También se puede explorar estrategias metaheurísticas que buscan un equilibrio entre la exploración y la explotación y que en ciertos casos son mejores que la

estrategia de búsqueda intermitente [Xin-She, 2013]. En otros casos, se pueden utilizar estrategias de búsqueda aleatorias combinadas que generan predicciones sobre cómo deben comportarse el agente en cada modo de búsqueda y cuándo debe cambiar el método de búsqueda. Varios organismos utilizan señales sensoriales no direccionales sin precisión para mejorar la búsqueda aleatoria y la teoría tradicional del forrajeo de parcelas [Noltinga, 2015].

Algunas aplicaciones de estos algoritmos se encuentran en robots autónomos que basan sus estrategias de búsqueda en las caminatas aleatorias de Lévy [Krivonosov, 2016]. Otra aplicación sería en redes complejas como en Internet, el tráfico urbano y el cerebro, donde se estudian estrategias de búsqueda en donde el agente (por ejemplo, un impulso eléctrico, una excitación, un animal o un individuo humano, tal como un surfista de la web), situado en un nodo de la red puede saltar a un nodo vecino, siempre que exista un enlace como se especifica en la matriz de adyacencia asociada con el gráfico. El caminante se desliza por la red a través de una secuencia de pasos, que permiten una exploración y búsqueda [Di Patti, 2015].

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Anderson, J. Stephens, D., and Dunbar S., Saltatory search: a theoretical analysis, *Behavioral Ecology*, Vol 8 No. 3: pp. 307-317, 1997. https://www.researchgate.net/publication/249282814_Saltatory_search_A_theoretical_analysis.
- [2] Bénichou, O., Loverdo, C., Moreau, M., Voituriez, R., Intermittent search strategies. *Review of modern physics*, volume 83, pp. 81-129, 2011, <http://www.normalesup.org/~loverdo/art/RevModPhys.pdf>.
- [3] Cuevas, M., Comparación de dos Estrategias bioinspiradas de búsqueda de objetivos aplicadas a la navegación nanorobótica. Caso de Estudio: Prevención del Cáncer. Tesis para obtener el título de Licenciado en Sistemas Computacionales Administrativos, Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Veracruzana, Agosto 2008, <http://cdigital.uv.mx/bitstream/123456789/28492/1/Cuevas%20Perez.pdf>.

- [4] Benhamou, S., Bovet, P., How animals use their environment: a new look at kinesis. *Anim. Behav.*, 38: pp. 375-383, 1989. http://www.cefe.cnrs.fr/images/stories/DPTeevolution/Ecomportementale/chercheurs/simon_benhamou/Benhamou%20&%20Bovet%201989AB.pdf.
- [5] Cavalcanti, A., Shirinzadeh B., Freitas, R. A. Hogg, T., Nanorobot architecture for medical target identification. *Nano-technology* 19: 015103, 2008, <http://www.nanorobotdesign.com/papers/nanorobot-architecture.pdf>.
- [6] Di Patti, F., Fanelli, D., Piazza, F. (2015). Optimal search strategies on complex multi-linked networks. *Nature Scientific Reports* 5, number: 9869, pp. 1-6. https://www.nature.com/articles/srep09869?WT.ec_id=SREP-639-20150512&spMailingID=48636705&spUserID=MzcxNDE0MDA3NzMS1&spJobID=681447381&spReportId=NjgxNDQ3MzgXS0.
- [7] Fernández, M., Algoritmos de búsqueda heurística en tiempo real. Aplicación a la navegación en los juegos de video.” 34 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa, 2005, <http://www.exa.unicen.edu.ar/catedras/aydalgo2/docs/TFca06aCompleto.pdf>.
- [8] Krivonosov, M., Denisov, S., & Zaburdaev, V. (2016). Lévy robotics. arXiv preprint arXiv:1612.03997, pp. 1–6, 2016, <https://arxiv.org/pdf/1612.03997.pdf>.
- [9] Pyke, G. (2015). Understanding movements of organisms: it's time to abandon the Lévy foraging hypothesis. *Methods in Ecology and Evolution*. Volume 6, Issue 1, Pages 1–16. Pages 1–16. Consultado el 31-05-17. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/2041-210X.12298/full>
- [10] Gutiérrez, G. (1998). Estrategias de forrajeo. En R. Ardila, W. López, A.M. Pérez, R. Quiñones, & F. Reyes (Eds.). *Manual de Análisis Experimental del Comportamiento*, pp. 359-381., 1998, Madrid: Librería Nueva, <http://www.docentes.unal.edu.co/gahermannr/docs/1998%20Estrategias%20de%20Forrajeo.pdf>.
- [11] Mueller, T., Fagan, W., Search and navigation in dynamic environments from individual behaviors to population distributions. *Oikos* 117, pp. 654-664: <http://www.clfs.umd.edu/biology/faganlab/pdf/MuellerFagan2008.pdf>.

- [12] Jones, R., Rupturing The Nanotech Rapture. Biological nanobots could repair and improve the human body, but they'll be more bio than bot. IEEE Spectrum's Special Report: The Singularity, 2008, <http://spectrum.ieee.org/semiconductors/nanotechnology/rupturing-the-nanotech-rapture/0>.
- [13] Nelson, M. (2017). Homework: week04_hw_template (kinesis strategies). Brain, Behavior & Info Processing Course, 2017, <http://output.jsbin.com/vecixe>.
- [14] Noltinga, B., Hinkelmanb, T., Brassilc, C., Tenhumberg, B., Composite random search strategies based on non-directional sensory cues. *Ecological Complexity*, Volume 22, pp. 126-138, 2015.
- [15] Piña, C., Rechy, E., García V., Comparing Three Simulated Strategies for Cancer Monitoring with Nanorobots. En A. Gelbukh and E.F. Morales (Eds.): MICAI 2008, LNAI 5317, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1020–1030, 2008, http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-88636-5_96.
- [16] Poza, D., Manual de Netlogo en español, 2009, <https://sites.google.com/site/manualnetlogo/>.
- [17] Svidinenko, Y., Simulation of a simple mobile cell-repair nanorobot and some of it's subsystems. *Nanotech*, 2015, http://www.nanotech-now.com/Art_Gallery/svidinenko-yuriy.htm.
- [18] Xin-She Yang and Xing shi He, Firefly Algorithm: Recent Advances and Applications, *Int. J. Swarm Intelligence*, Vol. 1, No. 1, pp. 36–50, 2013, https://www.researchgate.net/publication/255971821_Firefly_Algorithm_Rece nt_Advances_and_Applications.